与中红侧沟茧蜂生境与寄主定位相关的玉米及棉铃虫幼虫体表挥发性成分的提取与鉴定

石庆型[1,2], 罗庆怀[3], 赵 龙[4], 周正湘[5], 何广全[6], 韦 卫[2,*]

(1. 华南农业大学资源环境学院，广州 510642；2. 中国科学院动物研究所，农业虫害鼠害综合治理国家重点实验室，北京 100101；3. 贵州师范大学生命科学学院，贵阳 550001；4. 贵州省毕节地区农业科学研究所，贵州毕节 551700；5. 贵州大学昆虫研究所，贵阳 550025；6. 河北省饶阳县植保站，河北饶阳 053900)

摘要:【目的】鉴定玉米 *Zea mays* L. 和棉铃虫 *Helicoverpa armigera* (Hübner)幼虫体表挥发性成分中对中红侧沟茧蜂 *Microplitis mediator* (Haliday)具有生境与寄主定位作用的信息化合物,从化学生态学的角度研究玉米-棉铃虫-中红侧沟茧蜂三重营养关系,解释中红侧沟茧蜂寻找寄主的过程中的信息识别机制,为害虫的综合防治的"推-拉"方法提供一定的理论基础。【方法】利用触角电位仪(EAG)、触角电位联用仪(GC-EAD)、气质联用仪(GC-MS)及"Y"型嗅觉仪确定玉米和棉铃虫幼虫体表提取物的信息化合物。在室内利用玉米以及棉铃虫幼虫体表挥发物标准品化合物以及模拟混合物,使用"Y"型嗅觉仪进行中红侧沟茧蜂成虫行为反应试验。【结果】玉米挥发物中有 11 种化学成分,棉铃虫幼虫体表挥发物中有 6 种化学成分对中红侧沟茧蜂的触角具有电生理活性,其中 4 种成分在两种挥发物中都存在。室内行为反应试验发现:与正己烷对照相比,玉米的模拟组分对雌、雄蜂均表现出显著($P<0.05$)的诱引作用;棉铃虫 1 龄幼虫体表模拟组分对雌蜂具有极显著的诱引作用($P<0.01$),对雄蜂具有显著的诱引作用($P<0.05$);棉铃虫 2 龄幼虫体表模拟组分对雌蜂具有显著的诱引作用($P<0.05$)。【结论】本研究证明了玉米以及棉铃虫幼虫体表挥发物中分别存在 11 种(庚醛、2-己醇、1-己醇、1-辛烯-3-醇、壬醛、葵醛、苯甲醛、反式-2-壬烯-1-醇、己酸、苯基乙醇、月桂醇)和 6 种(2-己醇、己酸乙酯、1-己醇、壬醛、辛酸乙酯、癸醛)中红侧沟茧蜂生境及寄主定位的化学信息物质。

关键词: 中红侧沟茧蜂; 棉铃虫; 玉米; 寄主定位;信息化合物; 触角电位反应; 行为反应; 气相色谱-触角电位联用仪; 气相色谱-质谱联用仪

中图分类号: Q968　　**文献标识码:** A　　**文章编号:** 0454-6296(2015)03-0244-12

Extraction and identification of maize volatiles and cuticular volatiles of larval *Helicoverpa armigera* (Lepidoptera: Noctuidae) related to host-habitat location and host location of parasitic wasp *Microplitis mediator* (Hymenoptera: Braconidae)

SHI Qing-Xing[1,2], LUO Qing-Huai[3], ZHAO Long[4], ZHOU Zheng-Xiang[5], HE Guang-Quan[6], WEI Wei[2,*] (1. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. State Key Laboratory of Integrated Management of Pest Insects and Rodents, Institute of Zoology, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. School of Life Sciences, Guizhou Normal University, Guiyang 550001, China; 4. Bijie Agricultural Science Institute, Bijie, Guizhou 551700, China; 5. Institute of Entomology, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 6. Plant Protection Station of Raoyang County, Raoyang, Hebei 053900, China)

Abstract:【Aim】This study aims to identify maize (*Zea mays* L.) volatiles and cuticular volatiles of larval *Helicoverpa armigera* (Hübner) for host-habitat location and host location of *Microplitis mediator* (Haliday). The tritrophic interaction among maize, *H. armigera*, and *M. mediator* was investigated in the context of chemical ecology, and the mechanisms of chemical communications in host location of *M. mediator* were illustrated. The work has some implications for the "pull-push" approach in integrated pest management.【Methods】Semiochemicals from maize volatiles and cuticular volatiles of *H. armigera*

基金项目: 国家重点基础研究发展计划("973"计划)项目(2012CB114105)

作者简介: 石庆型,男, 1986 年生, 贵州黎平人, 博士研究生, 研究方向为农业昆虫与害虫防治, E-mail: shitoustone2729@126.com

* 通讯作者 Corresponding author, E-mail: weiwei@ioz.ac.cn

收稿日期 Received: 2014-05-23; 接受日期 Accepted: 2015-03-24

larvae were identified by using electroantennogram (EAG), gas chromatographic-electroantennographic detection (GC-EAD), gas chromatograph-mass spectrometer (GC-MS), and Y-tube olfactometer test equipment. Standard semiochemicals and the mimetic compounds of maize volatiles and cuticlular volatiles of *H. armigera* larvae were used to test behavioral responses of *M. mediator* with Y-tube olfactometer in the laboratory.【Results】Tested by GC-MS and GC-EAD, totally 11 compounds of maize volatiles and 6 compounds from cuticular volatiles of *H. armigera* larvae were found to be electrophysiologically active, of which 4 electrophysiologically active compounds were identified from both maize volatiles and cuticular volatiles of *H. armigera* larvae. Behavioral response tests in the laboratory showed that compared with the control of n-hexane male and female wasps were significantly attracted to the mimetic compounds of maize volatiles ($P<0.05$). Female wasps were significantly attracted to the mimetic compounds of cuticular volatiles of the 1st instar ($P<0.01$) and the 2nd instar larvae of *H. armigera* ($P<0.05$). Male wasps were significantly attracted to the synthesized compounds of cuticular volatiles of the 1st instar larvae of *H. armigera* ($P<0.05$).【Conclusion】These results demonstrated that 11 compounds (heptanal, 2-hexanol, 1-hexanol, 1-octen-3-ol, nonanal, decanal, benzaldehyde, *E*-2-nonen-1-ol, hexanoic acid, phenyethyl alcohol, and 1-dodecanol) from maize volatiles and six compounds (2-hexanol, ethyl hexanoate, 1-hexanol, nonanal, ethyl caprylate, and decanal) from cuticular volatiles of *H. armigera* larvae are responsible for host-habitat location and host location of *M. mediator*.

Key words: *Microplitis mediator*; *Helicoverpa armigera*; *Zea mays*; host location; semiochemical; EAG response; behavioral response; GC-EAD; GC-MS

自然界中寄生蜂寻找到合适的寄主是其种群繁衍的重要前提，寄生蜂的寄主搜索过程通常可分成寄主栖境定位(host habitat location)和寄主定位(host location)两个步骤。通过感应与靶标寄主相关的信息化合物来确定适合寄主的位置是重要的手段(Soler *et al.*, 2007)。一般情况下，植物会向环境中释放大量挥发性物质，这些成分是寄生蜂选择栖境和寄主定位的重要依据(Powell and Zhang, 1983; Elzen *et al.*, 1984; 侯照远和严顺福, 1997)。尤其是被其寄主昆虫危害的植物散发出来的挥发物，对天敌有强烈的引诱作用(姚英娟等, 2004; 魏建荣等, 2007)。同时，寄主体表的挥发物也是寄生蜂精确定位寄主的重要根据(Tumlinson *et al.*, 1993)。

近年来，化学生态上"推-拉"(利用趋避化学信息物资对害虫进行"推"，诱引化学信息物资对天敌进行"拉")这一新概念的提出，为害虫的综合防治提供了新的研究方向。中红侧沟茧蜂 *Microplitis mediator* (Haliday)属茧蜂科(Braconidae)小腹茧蜂亚科(Microgastrinae)侧沟茧蜂属 *Microplitis*，是一种内寄生蜂，其主要寄主包括棉铃虫 *Helicoverpa armigera* (Hübner)、粘虫 *Mythimna separata* (Walker)、甘蓝夜蛾 *Mamestra brassicae* Linnaeus 等农业上的重大害虫。中红侧沟茧蜂在华北田间对棉铃虫各世代低龄幼虫的平均寄生率可达22.9%，占低龄幼虫寄生蜂总数的58%(王德安等, 1984)。在辣椒田棉铃虫发生中度偏重的情况下，释放人工繁育的中红侧沟茧蜂对棉铃虫低龄幼虫的寄生率为65.68%～73.30%，防治效果可达80%以上(李建成, 2010)。中红侧沟茧蜂作为一种具有优良生物学、生态学特性的优势种天敌资源，在农业害虫防治上有广阔的应用前景。作为应用上内寄生蜂的模式种，其相关的生境定位及寄主定位等化学生态上的研究较少。贠桂玲(2004)发现，中红侧沟茧蜂对玉米 *Zea mays* L. 气味具有明显的趋向性；潘洪生等(2011)也开展了中红侧沟茧蜂雌蜂对各龄寄主幼虫气味的选择性试验，结果显示雌蜂趋向于选择低龄幼虫，以上的研究表明，与中红侧沟茧蜂密切相关的生境植物玉米及其寄主棉铃虫具有吸引中红侧沟茧蜂的化学信息成分，但都没有进行进一步的分析鉴定。本实验以玉米-棉铃虫-中红侧沟茧蜂三重营养关系为研究内容，对能引起中红侧沟茧蜂电生理反应的玉米挥发性物质和棉铃虫体表挥发物成分进行了初步鉴定，并采用"Y"型嗅觉仪测定了中红侧沟茧蜂对这些挥发性物质的趋向行为反应，从化学生态学的角度解释了天敌昆虫寻找寄主的过程，为害虫的综合防治提供一定的理论基础。同时，为中红侧沟茧蜂引诱剂研究提供依据。在目标防治田投放中红侧沟茧蜂生境定位的诱引剂，把周围的中红侧沟茧蜂成虫诱引过来，增加寄生率，可增加防治效果和保护天敌。或是在释放人工繁育的中红侧沟茧

蜂的田块中,投放中红侧沟茧蜂生境定位的诱引剂,使田块中保持高密度的中红侧沟茧蜂而提高防治效果。

1 材料与方法

1.1 供试玉米

供试玉米为华北地区种植品种农大 108。植株在室内光周期为 12L∶12D,温度为 25℃,相对湿度为 75% 的环境下进行培育。待植株长至约 1 m 时,作为待试材料。

1.2 供试昆虫

中红侧沟茧蜂滞育茧由河北省农林科学院植物保护研究所提供,寄生蜂在 25℃ 培养箱中孵育,设光周期为 12L∶12D,相对湿度为 75%,羽化后以 10% 的蜂蜜水为营养补给。

棉铃虫由中国科学院动物研究所农业虫害鼠害综合治理国家重点实验室森林害虫化学生态研究组提供,分别取 1 – 5 龄初期棉铃虫幼虫各 300(1 龄),200(2 龄),100(3 龄),50(4 龄)和 50(5 龄)头,饥饿处理 24 h 后,用于实验。

1.3 标准品化合物的配制

标准品化合物的来源见表 1。各标准品化合物溶液用正己烷作溶剂配制而成,根据实验要求将被测样品配制成浓度为 0.001 ~ 10 μg/μL 浓度系列(浓度以 10 倍递增)。各样品名称、纯度及来源见表 1。

表 1 19 种标准化合物的来源和纯度
Table 1 Sources and purity of nineteen standard chemicals

化合物 Chemicals	纯度 Purity (%)	生产厂家 Producer
庚醛 Heptanal	95	百灵威科技有限公司 Acros Organics
2-己醇 2-Hexanol	98	梯希爱(上海)化成工业发展有限公司 TCI (Shanghai) Development Co., Ltd.
辛醛 Octanal	99	百灵威科技有限公司 Acros Organics
1-己醇 1-Hexanol	98	梯希爱(上海)化成工业发展有限公司 TCI (Shanghai) Development Co., Ltd.
壬醛 Nonanal	95	百灵威科技有限公司 Acros Organics
1-辛烯-3-醇 1-Octen-3-ol	98	百灵威科技有限公司 Acros Organics
苯甲醛 Benzaldehyde	99	百灵威科技有限公司 Acros Organics
癸醛 Decanal	95	百灵威科技有限公司 Acros Organics
反式-2-癸醛 *E*-2-Decenal	95	百灵威科技有限公司 Acros Organics
反式-2-壬烯-1-醇 *E*-2-Nonen-1-ol	98	梯希爱(上海)化成工业发展有限公司 TCI (Shanghai) Development Co., Ltd.
己酸 Hexanoic acid	99	百灵威科技有限公司 Acros Organics
苯基乙醇 Phenyethyl alcohol	99	百灵威科技有限公司 Acros Organics
3-己醇 3-Hexanol	98	佛卢卡(西格玛奥尔德里奇)公司 Fluka (Sigma-Aldrich)
月桂醇 1-Dodecanol	98	百灵威科技有限公司 Acros Organics
己醛 Hexanal	97	佛卢卡(西格玛奥尔德里奇)公司 Fluka (Sigma-Aldrich)
十一碳酸 Undecanoic acid	99	百灵威科技有限公司 Acros Organics
己酸乙酯 Ethyl caproate	99	百灵威科技有限公司 Acros Organics
辛酸乙酯 Ethyl caprylate	99	百灵威科技有限公司 Acros Organics
油酸 Oleic acid	99	百灵威科技有限公司 Acros Organics

1.4　嗅觉反应气味源的制备

将待测气味的溶液置于胶头诱芯内，待溶液吸收完毕，用液体石蜡均匀涂于诱芯表面，使气味缓慢释放。待胶头诱芯表面的液体石蜡吸收完全后，分别装入自封袋中，放入冰箱中低温（−4℃）保存备用。每个诱芯所含的气味物质约 1 mg 当量。

1.5　挥发性化学物质的提取与分析

采取溶剂浸提法提取玉米挥发性化合物，所用溶剂为正己烷。将采集到的新鲜的玉米叶、雄蕊以及雌蕊各 5 g 置于具塞的磨口三角瓶中，加入 20 mL 重蒸馏正己烷，摇匀后避光萃取 4 h，脱水过滤后用氮气浓缩至 120 μL，用瓶塞密封后置入冰箱中低温（−4℃）保存备用。

将各龄棉铃虫幼虫 300（1 龄），200（2 龄），100（3 龄），50（4 龄）和 50（5 龄）头分别置于 50 mL 具塞的磨口三角瓶中，加入 20 mL 重蒸馏正己烷，摇匀后避光萃取 30 min，脱水过滤后用氮气浓缩至 120 μL，用瓶塞密封后置入冰箱中低温（−4℃）保存备用。

用 Agilent 6890N-5937N GC-MS 进行玉米以及棉铃虫幼虫体表粗提液成分的分析，色谱柱为 DB-WAX 毛细管柱（60 m×0. 25 mm×0. 25 μm, J&W Scientific Inc., Folsom, CA），进样量 2 μL，无分流进样。升温程序为起始温度 50℃，保持 1 min，以 5℃/min 的速率程序升温至 250℃，保持 10 min。电离方式 EI，电离能量为 70 eV，离子源发生器温度为 250℃，质量扫描范围为 30～350 amu。活性成分的鉴定在通过 GC-MS 总离子图与 GC-EAD 图谱比较之后，根据联机的 Nist08 数据库检索并结合质谱图中分子离子峰和碎片离子峰来定性，再通过人工化合物的保留时间和质谱图进行比对。

1.6　中红侧沟茧蜂成虫对玉米和棉铃虫幼虫体表粗提液及标准品化合物的 GC-EAD 反应

Agilent 6890 气相色谱检测器为 FID 氢火焰离子检测器，载气为氮气，无分流进样，进样量 2 μL。升温程序为：起始温度 50℃，保持 1 min，以 4℃/min 的速率程序升温至 250℃，保持 10 min。进样口温度 240℃，检测器温度 280 ℃。记录到的信号经放大器（UN-06, Syntech）连接到 IDAC 转换器（Auto Spike, IDAC2/3, Syntech），再接到计算机的硬件采集卡上，通过计算机软件（EAD 版本 2.3, Syntech）采集和分析数据。

在双目实体显微镜（XTL-I）下，用解剖剪将中红侧沟茧蜂的头剪下，再剪下一侧触角，然后用刀片快速切下保留着的触角的顶端约 0.1 mm，处理后触角长度约 6 mm，用导电硅胶将头和触角端部与 EAG 探头（PRG-2）叉状触角固定器的两个银电极联接，然后将电极插入 EAG 探头中。分离提取物的毛细柱为 DB-WAX 毛细管柱（60 m×0. 25 mm×0. 25 μm, J&W Scientific Inc., Folsom, CA），出口端接分流器（OSS-2, SGE, 澳大利亚），分流比 1∶2，分流的化合物一部分导入 FID 氢火焰离子检测器，另一部分经过加热套吹向触角（EAD），用 GC-EAD 软件（Syntech, The Netherlands）同步记录气相色谱和触角电位图。

1.7　中红侧沟茧蜂对玉米挥发物以及棉铃虫幼虫体表标准品化合物的触角电位反应

使用 Syntech 荷兰生产的触角电位仪，包括：Syntech UN-06 直流/交流放大器、Syntech CS-05 刺激放大器、Syntech MP-15 微动操作仪、Syntech WILD、M3Z 双目实体显微镜、Syntech 分析软件。连续气体流量为 124 mL/min，刺激气体流量为 20 mL/min，调节刺激时间为 0.1 s。每次将 10 μL 浓度分别为 0.001, 0.01, 0.1, 1 和 10 μg/μL 的测试标准品样液均匀滴在置于巴斯德吸管中的滤纸条上，待溶剂挥发后，迅速用吸耳球将溶剂吹出，管口一端连接刺激气体控制装置，另一端插入气味混合管上的侧孔。在双目显微镜（XTL-I）下，用解剖剪将中红侧沟茧蜂的头切下，并用刀片快速切下触角顶端约 0.1 mm，处理后触角长度约 6 mm，用导电硅胶将头和触角尖端分别与 EAG 探头（PRG-2）叉状触角固定器的两个银电极联接，然后将电极插入 EAG 探头中。测量时，待基线稳定后给予刺激，用脚踏板人为控制刺激，保持每次刺激时间为 0.1 s，连续 2 次刺激的时间间隔为 30 s 以上，以保证触角感受的完全恢复。刺激顺序为空白对照、样品低浓度到高浓度。每种样品测试雌雄蜂触角都不少于 6 根，每根触角刺激 5～10 次。测试的触角均以正己烷溶剂的刺激作为对照，每一样品测定值为平均数减去正己烷对照后的标准 EAG 反应值。

1.8　中红侧沟茧蜂成虫对玉米以及棉铃虫幼虫体表挥发物标准品化合物以及模拟混合物的行为反应

用“Y”型嗅觉仪（主臂 23 cm，两侧臂 13 cm，侧臂间夹角为 75°；主臂内部直径 1.5 cm，侧臂内部直径 1.5 cm）进行测试，气流经活性炭净化后通过玻璃转子流量计进入“Y”型管两侧。测试时，用含有玉米和棉铃虫体表有效成分的标准品化合物单品及模拟混合物（按模拟气味中，寄生蜂具有电生理活

性的成分的实际比例进行混合配制，配得混合物的溶质浓度为 1 mg/mL）的胶头诱芯作为诱引源，以含有正己烷的胶头诱芯作为对照。试验时将中红侧沟茧蜂由“Y”型管主臂管口引入，待其爬过主臂管口 3 cm 后开始计时。中红侧沟茧蜂在“Y”型管分叉处作出选择，取向不同的侧臂。每头虫观察 5 min，爬过侧臂 1/3 处，并且停留 1 min 以上记为对该气味有选择，否则记为对该气味无选择。每测 5 头成虫后调换“Y”型管的位置。每调换一次，先用酒精冲洗嗅觉仪各管道，并用电吹风吹干，然后将样品与对照互换位置，以消除管臂位置对中红侧沟茧蜂行为可能产生的影响。整个试验过程在 27 ± 2℃ 的室内进行，采用自然光照。每种气味共测试 30 头以上的蜂。

1.9 数据统计与分析

所有实验数据采用 SPSS19.0 软件进行统计分析。利用 Duncan 氏多重分析法比较中红侧沟茧蜂雌、雄蜂各自对挥发物质行为反应和 EAG 反应的差异。利用配对 T 检验分析比较雌、雄蜂 EAG 反应之间的差异。生测数据采用卡方检验比较差异显著性。

2 结果

2.1 玉米挥发物及棉铃虫幼虫体表挥发物的 GC-MS 分析

通过对棉铃虫幼虫体表粗提液进行 GC-MS 分析，获得了玉米浸提物和棉铃虫幼虫体表提取物的总离子流图（图 1）。

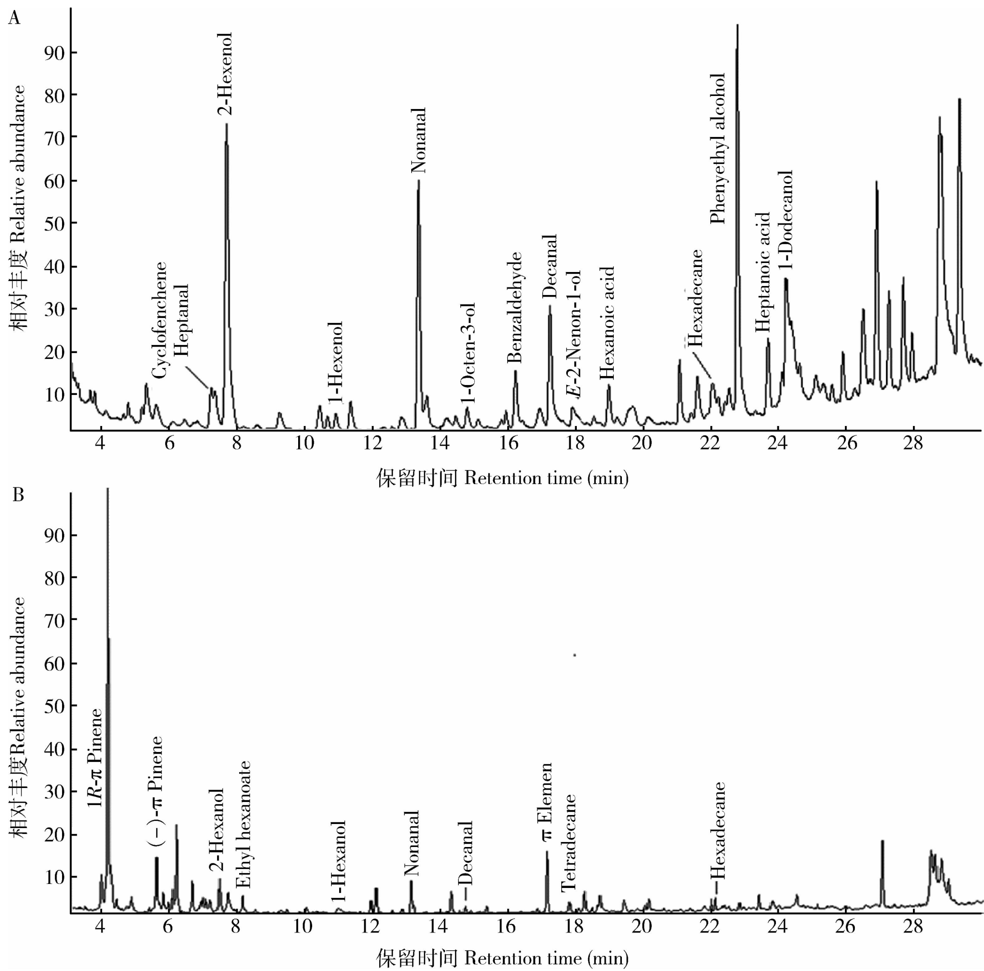


图 1 玉米（A）及 3 龄棉铃虫幼虫体表（B）浸提成分的总离子流图

Fig. 1 Total ion chromatogram of crude extracts from maize (A) and the cuticle of the 3rd instar larvae of *Helicoverpa armigera* (B)

2.2 玉米挥发物与棉铃虫幼虫体表粗提液及标准品化合物的 GC-EAD 反应

2.2.1 对玉米挥发物的反应：以玉米粗提液的 GC-MS 结果为基础，参考部分文献（Turlings *et al*., 1998；董文霞等，2004；潘洪生等，2011；Piesik *et al*., 2011；张康等，2011；赵振杰等，2011），从众多

的玉米挥发物成分中挑选出较可能使产生电生理反应的化合物 17 种，分别为 3-己醇、庚醛、2-己醇、辛醛、1-己醇、壬醛、1-辛烯-3-醇、苯甲醛、葵醛、乙基环己醇、反式-2-癸烯醛、反式-2-壬烯-1-醇、己酸、苯乙醇、月桂醇、壬酸、油酸，用正己烷为溶剂配成混合标样用于 GC-EAD 反应试验。从中红侧沟茧蜂触角对混合标样的 GC-EAD 反应（图 2）可知，在保留时间 9.170，9.703，12.720，15.619，16.151，16.506，18.754，22.008，23.073，24.493 及 28.930 min 时，存在能引起中红侧沟茧蜂触角电生理反应的活性物质。通过 GC-MS 总离子图与 GC-EAD 图谱分析比较，表明能引起中红侧沟茧蜂成虫触角电生理反应的成分为庚醛、2-己醇、1-己醇、壬醛、1-辛烯-3-醇、苯甲醛、葵醛、反式-2-壬烯-1-醇、己酸、月桂醇等 11 种物质。

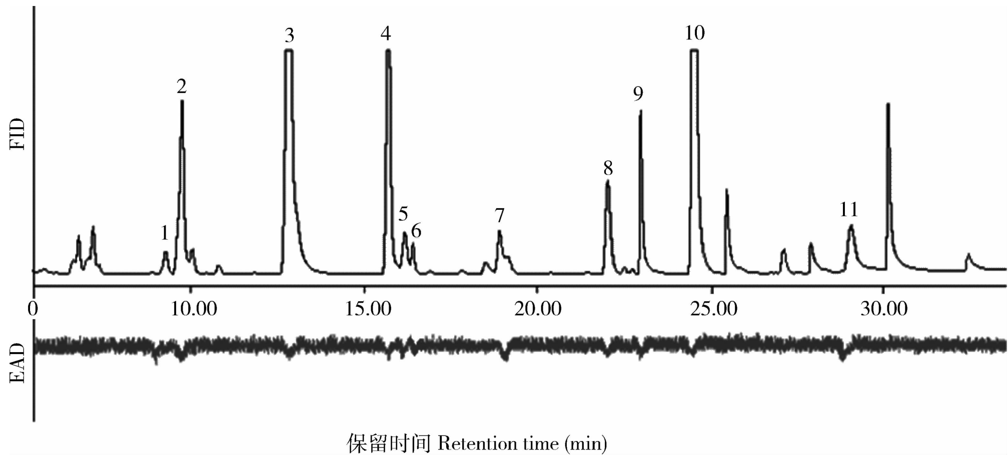


图 2　中红侧沟茧蜂对玉米挥发物标准品化合物的 GC-EAD 反应

Fig. 2　GC-EAD responses of antennae of *Microplitis mediator* to the standard chemicals of maize volatiles

1：庚醛 Heptanal；2：2-己醇 2-Hexanol；3：1-己醇 1-Hexanol；4：1-辛烯-3-醇 1-Octen-3-ol；5：壬醛 Nonanal；6：葵醛 Decanal；7：苯甲醛 Benzaldehyde；8：反式-2-壬烯-1-醇 *E*-2-Nonen-1-ol；9：己酸 Hexanoic acid；10：苯基乙醇 Phenyethyl alcohol；11：月桂醇 1-Dodecanol.

2.2.2　对棉铃虫幼虫体表挥发物的反应：分别用棉铃虫 1 –5 龄幼虫体表粗提物进行实验，结果显示 3 龄幼虫体表粗提物所含有效反应成分的物质数量以及单个物质的含量也较为均衡，从中红侧沟茧蜂触角对棉铃虫 3 龄幼虫体表粗提液的 GC-EAD 反应（图 3：A）可知，在保留时间 9.548，12.058，12.868，16.324，17.990 及 19.373 min 时，存在能引起中红侧沟茧蜂触角电生理反应的活性物质，但由于含量较少，色谱峰均不明显。通过 GC-MS 总离子图与 GC-EAD 图谱分析比较，表明能引起中红侧沟茧蜂触角电生理反应的成分为 2-己醇、己酸乙酯、1-己醇、壬醛、辛酸乙酯、癸醛 6 种物质。图 3（B）为中红侧沟茧蜂触角对这 6 种标准品化合物的 GC-EAD 反应，6 种物质均能引起中红侧沟茧蜂触角较明显的触角电位反应。表 2 为各龄期幼虫体表 6 种有效成分的比例。

表 2　各龄棉铃虫幼虫体表挥发性物质中 6 种有效成分的相对含量

Table 2　Relative content of the six effective components of cuticular volatiles of different instar larvae of *Helicoverpa armigera*

幼虫龄期 Larval instar	相对含量 Relative content (%)					
	2-己醇 2-Hexanol	1-己醇 1-Hexanol	壬醛 Nonanal	葵醛 Decanal	乙酸乙酯 Ethyl caproate	辛酸乙酯 Ethyl caprylate
1 龄 1st instar	66.77	12.18	14.85	6.20	0	0
2 龄 2nd instar	53.83	16.14	22.75	0	0.47	0.54
3 龄 3rd instar	22.54	16.55	33.07	8.12	14.67	5.05
4 龄 4th instar	46.40	24.31	22.34	6.95	0	0
5 龄 5th instar	32.12	66.72	0.44	0.04	0.52	0.17

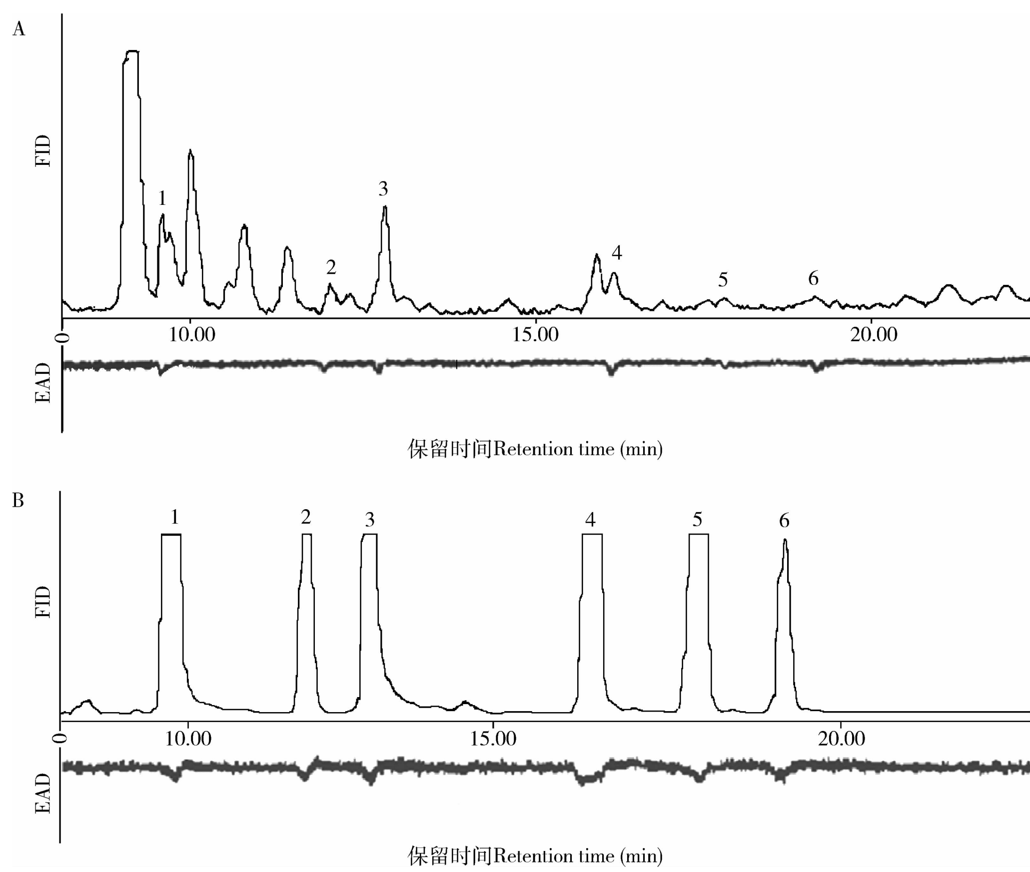


图 3　中红侧沟茧蜂对棉铃虫 3 龄幼虫体表粗提液(A)和标准品化合物(B)的 GC-EAD 反应

Fig. 3　GC-EAD responses of antennae of *Microplitis mediator* to the crude extract from the cuticle of the 3rd instar larvae of *Helicoverpa armigera* (A) and standard chemicals (B)

1: 2-己醇 2-Hexanol; 2: 己酸乙酯 Ethyl caproate; 3: 1-己醇 1-Hexanol; 4: 壬醛 Nonanal; 5: 辛酸乙酯 Ethyl caprylate; 6: 葵醛 Decanal.

2.3　中红侧沟茧蜂对标准化合物不同刺激剂量的触角反应

2.3.1　对玉米信息化合物的反应:中红侧沟茧蜂触角对 11 种标准化合物的 EAG 反应的电位值如表 3 所示,在庚醛、2-己醇、1-己醇、壬醛、1-辛烯-3-醇、苯甲醛、葵醛、反式-2-壬烯-1-醇、己酸、苯基乙醇、月桂醇等不同刺激剂量的刺激下,成虫都能引起一定的触角电位反应。刺激剂量为 0.01 μg 时,除雄蜂对苯甲醛的反应略强外,其他反应均非常微弱;当刺激剂量逐渐增大时,各物质引起的反应均逐渐增强,均在最高剂量(100 μg)时电位反应达到最高值,但雌雄对苯基乙醇、月桂醇和雄蜂对 1-辛烯-3-醇、葵醛引起的电位反应始终弱于其他物质。当刺激剂量为 100 μg 时,除雌雄蜂对苯基乙醇、月桂醇以及雄蜂对 1-辛烯-3-醇、葵醛的反应外,其他项在该剂量引起的反应均比较显著。

雌蜂除对葵醛刺激剂量为 0.01 μg,壬醛刺激剂量为 0.1 和 1 μg,庚醛刺激剂量为 0.01,0.1 和 1 μg,1-己醇和反式-2-壬烯-1-醇刺激剂量为 0.01,0.1,1 和 10 μg 的 EAG 反应弱于雄蜂外,其他均比雄蜂强。配对样本 T 检验表明,当刺激剂量为 0.01 μg 时,雌、雄蜂对 1-己醇的电位反应表现显著差异($P<0.05$),对苯甲醛存在极显著($P<0.01$);当刺激剂量为 0.1 μg 时,雌、雄蜂对 1-辛烯-3-醇及苯甲醛的反应有显著差异($P<0.05$),对 1-己醇存在极显著差异($P<0.01$);当刺激剂量为 1 μg 时,雌、雄蜂对 1-己醇、苯甲醛和苯基乙醇的电位反应有显著差异($P<0.05$),对 1-辛烯-3-醇存在极显著的差异($P<0.01$);当刺激剂量为 10 μg 时,雌、雄蜂对苯甲醛及反式-2-壬烯-1-醇的电位反应有显著差异($P<0.05$);当刺激剂量为 100 μg 时,雌、雄蜂对 2-己醇、1-辛烯-3-醇和葵醛有显著差异,对苯甲醛存在极显著的差异($P<0.05$);其他组比较中雌、雄蜂差异不显著($P>0.05$)。

2.3.2　对棉铃虫幼虫体表信息化合物的反应:中红侧沟茧蜂触角对 6 种标准化合物的 EAG 反应的电位值如表 4 所示,2-己醇、己酸乙酯、1-己醇、壬醛、辛酸乙酯、癸醛等不同剂量的刺激下,成虫都能

表 3　中红侧沟茧蜂对 11 种玉米挥发性物质标准品化合物不同刺激剂量的触角电位反应(mV)

Table 3　EAG responses (mV) of the antenna of *Microplitis mediator* adults to different dosages of standard chemicals of 11 volatiles of maize

化合物 Chemical	性别 Sex	刺激剂量 Dosage (μg) 0.01	0.1	1	10	100
庚醛 Heptanal	♀	0.053 ± 0.022 cC	0.159 ± 0.043 cC	0.352 ± 0.085 cBC	1.140 ± 0.272 bB	2.038 ± 0.367 aA
	♂	0.181 ± 0.064 cB	0.295 ± 0.049 bcB	0.432 ± 0.092 bcB	0.696 ± 0.102 bB	1.826 ± 0.226 aA
2-己醇 2-Hexanol	♀	0.053 ± 0.017 eD	0.327 ± 0.027 dC	0.662 ± 0.078 cB	0.785 ± 0.031 bB	1.428 ± 0.108 aA
	♂	0.046 ± 0.017eE	0.186 ± 0.033 dD	0.453 ± 0.027 cC	0.648 ± 0.035 bB	1.013 ± 0.037 aA
1-己醇 1-Hexanol	♀	0.043 ± 0.017 cB	0.180 ± 0.034 bcB	0.262 ± 0.055 bcB	0.394 ± 0.063bB	1.065 ± 0.173aA
	♂	0.070 ± 0.010 dD	0.331 ± 0.055 cC	0.694 ± 0.064 bB	0.770 ± 0.059 bAB	0.949 ± 0.053 aA
壬醛 Nonanal	♀	0.086 ± 0.007 dD	0.209 ± 0.009 cdCD	0.359 ± 0.035 cC	0.830 ± 0.044 bB	1.274 ± 0.108 aA
	♂	0.068 ± 0.010 eE	0.235 ± 0.027 dD	0.400 ± 0.016 cC	0.731 ± 0.028 bB	1.117 ± 0.066 aA
1-辛烯-3-醇 1-Octen-3-ol	♀	0.075 ± 0.018 cB	0.129 ± 0.009 bcB	0.256 ± 0.046 bcB	0.415 ± 0.058 bB	1.207 ± 0.197 aA
	♂	0.042 ± 0.016 cC	0.064 ± 0.009 cC	0.116 ± 0.023 cC	0.318 ± 0.070 bB	0.534 ± 0.025 aA
苯甲醛 Benzaldehyde	♀	0.048 ± 0.007 cB	0.213 ± 0.040 bcB	0.321 ± 0.071 bcB	0.518 ± 0.137 bAB	1.022 ± 0.255 aA
	♂	0.366 ± 0.037 dD	0.473 ± 0.074 dCD	0.706 ± 0.061 cBC	0.938 ± 0.099 bB	1.466 ± 0.050 aA
葵醛 Decanal	♀	0.118 ± 0.081 cB	0.227 ± 0.069 cB	0.287 ± 0.065 bcB	0.639 ± 0.142 abAB	0.928 ± 0.188 aA
	♂	0.120 ± 0.020 cB	0.143 ± 0.011 bcB	0.213 ± 0.015 bcB	0.254 ± 0.023 bB	0.452 ± 0.084 aA
反式-2-壬烯-1-醇 *E*-2-Nonen-1-ol	♀	0.116 ± 0.044 cC	0.264 ± 0.097 cBC	0.387 ± 0.082 bcBC	0.646 ± 0.092 bB	1.854 ± 0.216 aA
	♂	0.127 ± 0.033 dD	0.362 ± 0.080 cCD	0.580 ± 0.078 bcBC	0.807 ± 0.071 bB	1.638 ± 0.115 aA
己酸 Hexanoic acid	♀	0.126 ± 0.047 bB	0.187 ± 0.072 bB	0.342 ± 0.104 bB	0.556 ± 0.131 bB	1.820 ± 0.419 aA
	♂	0.094 ± 0.038 bB	0.192 ± 0.045 bB	0.260 ± 0.051 bB	0.499 ± 0.120 bB	1.435 ± 0.301 aA
苯基乙醇 Phenyethyl alcohol	♀	0.073 ± 0.015 dC	0.196 ± 0.022 cB	0.204 ± 0.010 cB	0.317 ± 0.024 bA	0.397 ± 0.040 aA
	♂	0.098 ± 0.046 dC	0.245 ± 0.052 cdBC	0.325 ± 0.029 bcBC	0.452 ± 0.051 bAB	0.635 ± 0.096 aA
月桂醇 1-Dodecanol	♀	0.086 ± 0.027 cC	0.208 ± 0.049 bcBC	0.358 ± 0.061 abAB	0.441 ± 0.039 aAB	0.544 ± 0.102 aA
	♂	0.128 ± 0.082bA	0.310 ± 0.158 abA	0.403 ± 0.137 abA	0.466 ± 0.142 abA	0.686 ± 0.137 aA

经 Duncan 氏多重分析比较,同一行内具有不同小写和大写字母的数据(平均值 ± 标准差)分别表示差异显著($P<0.05$)和差异极显著($P<0.01$);表4 同。Different small and capital letters following the data (mean ± *SD*) in a row indicate significant difference at the 0.05 level and extremely significant difference at the 0.01 level, respectively (Duncan's test). The same for Table 4.

表 4　中红侧沟茧蜂对 6 种棉铃虫幼虫体表挥发性成分的触角电位反应(mV)

Table 4　EAG responses (mV) of the antenna of *Microplitis mediator* adults to 6 standard chemicals of cuticular volatiles of *Helicoverpa armigera* larvae

化合物 Chemical	性别 Sex	刺激剂量 Dosage (μg) 0.01	0.1	1	10	100
2-己醇 2-Hexanol	♀	0.053 ± 0.017 eD	0.327 ± 0.027 dC	0.662 ± 0.078 cB	0.785 ± 0.031 bB	1.428 ± 0.108 aA
	♂	0.046 ± 0.017eE	0.186 ± 0.033 dD	0.453 ± 0.027 cC	0.648 ± 0.035 bB	1.013 ± 0.037 aA
己酸乙酯 Ethyl caproate	♀	0.049 ± 0.007 bB	0.065 ± 0.008 bB	0.083 ± 0.010 bB	0.395 ± 0.152 bAB	0.842 ± 0.218 aA
	♂	0.121 ± 0.015 cC	0.284 ± 0.036 bcBC	0.384 ± 0.061 bBC	0.469 ± 0.074 bAB	0.678 ± 0.090 aA
1-己醇 1-Hexanol	♀	0.043 ± 0.017 cB	0.180 ± 0.034 bcB	0.262 ± 0.055 bcB	0.394 ± 0.063 bB	1.065 ± 0.173aA
	♂	0.070 ± 0.010 dD	0.331 ± 0.055 cC	0.694 ± 0.064 bB	0.770 ± 0.059 bAB	0.949 ± 0.053 aA
壬醛 Nonanal	♀	0.086 ± 0.007 dD	0.209 ± 0.009 cdCD	0.359 ± 0.035 cC	0.830 ± 0.044 bB	1.274 ± 0.108 aA
	♂	0.068 ± 0.010 eE	0.235 ± 0.027 dD	0.400 ± 0.016 cC	0.731 ± 0.028 bB	1.117 ± 0.066 aA
辛酸乙酯 Ethyl caprylate	♀	0.041 ± 0.017 dC	0.082 ± 0.011 cdBC	0.102 ± 0.014 bcBC	0.141 ± 0.013 bB	0.256 ± 0.025 aA
	♂	0.058 ± 0.010 dD	0.150 ± 0.006 cCD	0.221 ± 0.036 cC	0.341 ± 0.037 bB	0.481 ± 0.014 aA
葵醛 Decanal	♀	0.118 ± 0.081 cB	0.227 ± 0.069 cB	0.287 ± 0.065 bcB	0.639 ± 0.142 abAB	0.928 ± 0.188 aA
	♂	0.120 ± 0.020 cB	0.143 ± 0.011 bcB	0.213 ± 0.015 bcB	0.254 ± 0.023 bB	0.452 ± 0.084 aA

引起一定的触角电位反应,但雌、雄蜂对辛酸乙酯以及雄蜂对葵醛引起的电位反应始终弱于其他物质。当刺激剂量逐渐增大时,各物质引起的反应均逐渐增强,当刺激达到最高剂量(100 μg)时,除雌、雄蜂对辛酸乙酯以及雄蜂对葵醛引起的电位反应较弱外,其他组引起的反应都比较显著。

雌蜂除对己酸乙酯及 1-己醇刺激剂量为 0.01, 0.1, 1 和 10 μg, 壬醛刺激剂量为 0.1 和 1 μg,辛酸乙酯剂量为 0.01, 0.1, 1, 10 和 100 μg,葵醛刺激剂量为 0.01 μg 的 EAG 反应弱于雄蜂外,其他均比雄蜂强。配对样本 *T* 检验表明,当刺激剂量为 0.01 μg 时,雌、雄蜂对己酸乙酯的电位反应表现极显著

差异($P<0.01$);当刺激剂量为 0.1 μg 时,雌、雄蜂对已酸乙酯的反应有显著差异($P<0.05$),对辛酸乙酯存在极显著差异($P<0.01$);当刺激剂量为 1 μg 时,雌、雄蜂对已酸乙酯及 1-己醇的电位反应有显著差异($P<0.05$);当刺激剂量为 10 μg 时,雌、雄蜂对辛酸乙酯的电位反应有显著差异($P<0.05$);当刺激剂量为 100 μg 时,雌、雄蜂对辛酸乙酯存在极显著差异($P<0.01$)。

2.4 中红侧沟茧蜂对信息物质组分标准品化合物及模拟混合物的行为反应

2.4.1 对玉米挥发物标准品的反应:在中红侧沟茧蜂对玉米挥发性物质标准品以及模拟混合气味的行为反应试验中(表 5),对 12 种气味中,除雄蜂对庚醛及 2-己醇的反应率分别只有 56.7% 和 58.1% 外,其他均在 60% 以上的较高的反应率。雌蜂对 1-己醇反应率最高,达到 90.0%;雄蜂对已酸反应率最高,达到 93.1%。除雌、雄蜂对庚醛均表现出一定趋避性,以及苯基乙醇表现非常弱的趋性外,其他大部分物质表现出一定趋向性选择。经卡方检验表明,反式-2-壬烯-1-醇与对照组相比均表现出对雌蜂显著的诱引作用($P<0.05$);月桂醇与对照组相比均表现出对雄蜂显著的诱引作用($P<0.05$);而玉米模拟混合气味与对照组相比对雌、雄蜂都存在显著的诱引作用($P<0.05$);其余气味对雌雄诱引、趋避作用没有显著差异($P>0.05$),即定向作用不明显。

表 5 以正己烷为对照在"Y"型管测定的中红侧沟茧蜂对 11 种玉米挥发物及模拟混合物的行为反应

Table 5 Behavioral responses of *Microplitis mediator* adults to 11 standard chemicals and mimetic compounds of maize volatiles tested in the Y-tube with n-hexane as the control

化合物 Chemical	性别 Sex	引诱率(%) Luring rate	趋避率(%) Repellent rate	χ^2	反应率(%) Response rate
庚醛 Heptanal	♀	23.3	33.3	0.529	56.7
	♂	23.3	46.7	2.333	70.0
2-己醇 2-Hexanol	♀	42.9	35.7	0.182	78.6
	♂	41.9	19.4	0.727	61.3
1-己醇 1-Hexanol	♀	53.3	36.7	0.926	90.0
	♂	50.0	21.9	3.522	71.9
壬醛 Nonanal	♀	41.9	19.4	2.579	61.3
	♂	50.0	28.6	1.636	78.6
1-辛烯-3-醇 1-Octen-3-ol	♀	34.3	28.6	0.182	62.9
	♂	45.2	12.9	2.333	58.1
苯甲醛 Benzaldehyde	♀	53.3	30.0	1.960	83.3
	♂	40.0	26.7	0.800	66.7
葵醛 Decanal	♀	43.3	23.3	1.800	66.7
	♂	37.9	31.0	0.200	69.0
反式-2-壬烯-1-醇 *E*-2-Nonen-1-ol	♀	54.5	24.2	4.481 *	78.8
	♂	48.6	34.3	0.862	82.9
己酸 Hexanoic acid	♀	50.0	32.5	2.613	82.5
	♂	58.6	34.5	1.815	93.1
苯基乙醇 Phenezathyl alcohol	♀	40.0	40.0	0.000	80.0
	♂	36.4	39.4	0.040	75.8
月桂醇 1-Dodecanol	♀	41.9	19.4	2.579	61.3
	♂	50.0	16.7	5.000 *	66.7
玉米人工模拟化合物 Mimetic compounds of maize volatiles	♀	64.5	25.8	5.143 *	90.3
	♂	56.7	23.3	4.167 *	80.0

* $P<0.05$; ** $P<0.01$. 表 6 同 The same for Table 6.

2.4.2 对棉铃虫幼虫体表挥发物标准品的反应:在中红侧沟茧蜂对棉铃虫幼虫体表发性物质标准品以及体表模拟混合气味的行为反应试验中(表 6),各气味与对照相比均表现一定的诱引作用。雌、雄蜂对所有气味的反应率分均在 60% 以上的较高的反应率,最高达 90.6%。经检验表明,辛酸乙酯及棉铃虫 2 龄幼虫体表挥发物模拟气味均对雌蜂表现出显著的诱引作用($P<0.05$),而且,棉铃虫 1 龄幼虫体表挥发物模拟气味对雌蜂表现出极显著的诱引作用($P<0.01$);棉铃虫 1 龄幼虫体表挥发物模拟气味对雄蜂亦表现出显著的诱引作用($P<0.05$);而在其他组试验中,定向作用均不显著($P>0.05$)。

表 6　以正己烷为对照在"Y"型管测定的中红侧沟茧蜂对 6 种棉铃虫体表挥发物及各龄幼虫体表模拟混合物的行为反应

Table 6　Behavioral responses of *Microplitis mediator* adults to 6 standard chemicals and mimetic compounds of cuticular volatiles of different instar larvae of *Helicoverpa armigera* tested in the Y-tube with n-hexane as the control

化合物 Chemical	性别 Sex	选择率(%) Luring rate	趋避率(%) Repellent rate	χ^2	反应率(%) Response rate
2-己醇 2-Hexanol	♀	42.9	35.7	0.182	78.6
	♂	41.9	19.4	0.727	61.3
己酸乙酯 Ethyl caproate	♀	46.7	20	3.2	66.7
	♂	50	20	0.429	70
1-己醇 1-Hexanol	♀	53.3	36.7	0.926	90
	♂	50	21.9	3.522	71.9
壬醛 Nonanal	♀	41.9	19.4	2.579	61.3
	♂	50	28.6	1.636	78.6
辛酸乙酯 Ethyl caprylate	♀	55.6	14.8	6.368 *	70.4
	♂	41.9	19.4	2.579	61.3
庚醛 Decanal	♀	43.3	23.3	1.8	66.7
	♂	37.9	31	0.2	69
1L	♀	61.3	19.4	6.760 **	80.6
	♂	58.1	19.4	6.000 *	77.4
2L	♀	62.5	28.1	4.172 *	90.6
	♂	51.5	30.3	1.815	81.8
3L	♀	51.7	27.6	2.13	79.3
	♂	51.6	25.8	2.667	77.4
4L	♀	45.2	32.3	0.667	77.4
	♂	37.5	37.5	0	75
5L	♀	33.3	36.7	0.048	70
	♂	41.4	27.6	0.8	69

1－5L：1－5 龄各龄棉铃虫幼虫信息化合物的人工模拟化合物 Mimetic compounds of semiochemicals of the 1st－5th instar larvae of *H. armigera*, respectively.

3　讨论

利用信息化合物来进行生境以及寄主的定位是昆虫采取的普遍且至关重要的途径。植食性昆虫利用寄主植物散发的挥发性物质进行寄主的定位，同时，天敌昆虫也可利用植物的气味找到寄主，尤其是被植食性昆虫危害的植物的挥发气味。贠桂玲(2004)将中红侧沟茧蜂对健康 Bt 玉米(MONS10)、健康常规玉米与空白对照(干净空气)的反应相比，发现前二者对中红侧沟茧蜂具有较明显的诱引作用，但具体是哪些化学成分起作用并未探究。本研究通过对玉米浸提液进行 GC-MS 分析，确定其成分。但由于浸提液的成分繁杂，且部分成分含量较低，通过参考部分文献，本实验选取部分常见的以及可能对中红侧沟茧蜂触角有电生理反应的化合物进行实验，共计 17 种。将 17 中化合物混合标准样品，进一步进行中红侧沟茧蜂的触角电生理活性测定。测定结果表明在这 17 种化合物中有庚醛、2-己醇、1-己醇、壬醛、1-辛烯-3-醇、苯甲醛、葵醛、反式-2-壬烯-1-醇、己酸、月桂醇等 11 种能引起中红侧沟茧蜂的触角电位反应(表 3)，且对具有活力的成虫对标准品混合物具有显著的行为选择($P<0.05$)，由此结果可以初步推断，这些玉米挥发物成分在中红侧沟茧蜂的生境及寄主定位中起着一定作用，也在一定程度上从化学生态学的角度解释了为什么玉米对中红侧沟茧蜂具有较强的诱引作用。

植食性昆虫体表挥性物质同样也是天敌昆虫寄主定位的重要依据。对于寄生蜂种群而言，寄主品质(如寄主体型大小和寄主日龄)是调控寄生蜂后代性比的一个重要因素(King, 1987)。中红侧沟茧蜂作为棉铃虫的重要寄生物，王德安等(1984)在对中红侧沟茧蜂寄生棉铃虫的生物学研究中发现，中红侧沟茧蜂对 1－3 龄棉铃虫幼虫都能产卵寄生，但以对棉铃虫 2 龄幼虫的寄生率与单雌产仔数最高，为适宜的寄生对象。刘小侠等(2004)以室内饲养的棉铃虫幼虫和中红侧沟茧蜂为材料，研究了寄主大小对中红侧沟茧蜂产卵和生长发育的影响。结果表明，中红侧沟茧蜂雌蜂产卵行为对寄主大小有显著的选择性，成功寄生率随寄主体重的增加而降

低。但对于对寄主大小选择机制没有进一步的报道。潘洪生等(2011)开展的中红侧沟茧蜂雌蜂对棉铃虫1－5 龄寄主幼虫气味的选择性试验结果表明,中红侧沟茧蜂对棉铃虫 1 和 2 龄幼虫的气味具有较明显的趋向性,但具体的有效成分并未确定。本研究中,从棉铃虫幼虫体表粗提液鉴定出 2-己醇、己酸乙酯、1-己醇、壬醛、辛酸乙酯、癸醛等 6 种对中红侧沟茧蜂具有电生理反应的信息化合物,经过人工化学标品的选择性选择试验(包含各单品及模拟混标),对中红侧沟茧蜂均有一定诱引作用。证明这 6 种化合物即为棉铃虫幼虫体表挥发物中中红侧沟茧蜂的寄主定位信息素。将按各龄期 6 种物质的真实比例配制成的 1－5 龄幼虫人工混合标准样品模拟化学信息源进行趋向性选择试验,结果显示 1 龄幼虫模拟化学信息源对中红侧沟茧蜂雌蜂有极显著的诱引作用($P<0.01$),对雄蜂有显著的诱引作用($P<0.05$);2 龄幼虫模拟化学信息源对雌蜂有显著的诱引作用($P<0.05$)。由此可知,中红侧沟茧蜂可依据寄主体表的信息素的成分及组分的比例来识别寄主的龄期,从而选择使自己具有较高适合度的个体。通过对各龄期幼虫体表成分中 6 种物质的比较,结果显示 2-己醇、1-己醇和壬醛 3 种化合物在各龄期幼虫 6 种成分中相对含量之和分别占 93.80%(1 龄)、92.72%(2 龄)、72.16%(3 龄)、93.05%(4 龄)和99.28%(5 龄),是 6 种中红侧沟茧蜂寄主定位化学信息物质中的主要成分。且在比对 EAG 反应结果中发现,与这 3 种主要成分相比己酸乙酯、辛酸乙酯及葵醛的反应均处于低水平。虽然在选择性试验中中红侧沟茧蜂雌蜂对辛酸乙酯表现出显著诱引作用,但在棉铃虫 1 龄幼虫体表粗提物中 GC-MS 分析中未检测到这两种物质,且在棉铃虫 2 龄幼虫体表粗提物中的含量也非常少;葵醛在棉铃虫 2 龄幼虫体表粗提物中也未检测到。所以由此可推测,己酸乙酯、辛酸乙酯及葵醛在中红侧沟茧蜂的寄主识别中的贡献有限,而 2-己醇、1-己醇及壬醛则起着主要作用。

董文霞等(2000)在所测的棉花中的挥发性物质中,中红侧沟茧蜂的触角电位反应不因雌雄的差别而不同。在本研究中,雌、雄蜂之间对挥发性物质的触角电位反应的配对样本 T 检验结果显示,除少数几组存在显著差异($P<0.05$)外,其他均无显著差异($P>0.05$)。从而整体上支持了中红侧沟茧蜂的触角电位反应不因雌雄的差别而不同的结论。研究中发现雌蜂在大多数情况下,触角电位反应均大于雄蜂,这可能是由于大多数雄蜂羽化的时间早于雌蜂(李建成等,2010),触角活力低于同时进行实验的雌蜂。

综上所述,本研究发现玉米与棉铃虫幼虫体表确实存在一些化学信息物质,在中红侧沟茧蜂的生境及寄主定位过程中起一定作用,从化学生态学的角度解释了中红侧沟茧蜂寻找寄主的过程。本研究的趋性试验部分仅在室内,还有待进一步的野外试验验证。

致谢　在实验技术方面得到中国科学院动物研究所农业虫害鼠害综合治理研究国家重点实验室王睿高级工程师的耐心指导,在中红侧沟茧蜂虫源上得到河北省农林科学院植物保护研究所李建成研究员的大力帮助。作者在此致以衷心的感谢。

参考文献(References)

Dong WX, Hu BW, Zhang ZN, Han BY, 2004. Electrophysiological and behavioural responses of *Microplitis mediator* to tobacco plant volatiles. *Acta Ecologica Sinica*, 24(10): 2252－2256. [董文霞, 胡保文, 张钟宁,韩宝瑜, 2004. 中红侧沟茧蜂对烟草挥发物的触角电生理及行为反应. 生态学报, 24(10): 2252－2256]

Dong WX, Wang R, Zhang ZN, 2000. Electroantennal responses of a parasitoid (*Microplitis mediator*) to cotton plant volatiles. *Acta Entomologica Sinica*, 43(Suppl.): 119－125. [董文霞, 王睿, 张钟宁, 2000. 中红侧沟茧蜂对棉花挥发性物质的触角电位反应, 昆虫学报, 43(增刊): 119－125]

Elzen GW, Williams HJ, Vinson SB, 1984. Role of diet in host selection of *Heliothis virescens* by parasitoid *Campoletis sonorensis* (Hymeuoptera: Ichneumonidae). *Journal of Chemical Ecology*, 10(11): 1535－1541.

Hou ZY, Yan FS, 1997. Progress in the study on host selection behaviors of parastic wasps. *Acta Entomologica Sinica*, 40(1): 94－107. [侯照远, 严福顺, 1997. 寄生蜂寄主选择行为研究进展. 昆虫学报, 40(1): 94－107]

King BH, 1987. Offspring sex ratios in parasitoid wasps. *Quarterly Review of Biology*, 62(4): 367－396.

Li JC, Lu ZY, Qu ZG, Liu WX, 2010. Research progress of *Microplitis mediator* and its application. *Journal of Hebei Agricultural Sciences*, 14(8): 4－11. [李建成, 路子云, 屈振刚, 刘文旭, 2010. 中红侧沟茧蜂研究及应用进展. 河北农业科学, 14(8): 4－11]

Liu XX, Zhang QW, Li JC, Xu J, 2004. Effects of host size on oviposition and development of the endoparasitoid, *Microplitis mediator* Haliday. *Chinese Journal of Biological Control*, 20(2): 110－113. [刘小侠, 张青文, 李建成, 徐静, 2004. 寄主大小对中红侧沟茧蜂产卵和发育的影响. 中国生物防治, 20(2): 110－113]

Pan HS, Zhao QJ, Zhao KJ, Zhang YJ, Wu KM, Guo YY, 2011. Responses of *Microplitis mediator* Haliday (Hymenoptera:

Braconidae) to different instar larvae of *Helicoverpa armigera* Hübner (Lepidoptera: Noctuidae) and damaged cotton plants. *Acta Entomologica Sinica*, 54(4): 437 – 442. [潘洪生, 赵秋剑, 赵奎军, 张永军, 吴孔明, 郭予元, 2011. 中红侧沟茧蜂对不同龄期棉铃虫幼虫及其为害棉株的趋性反应. 昆虫学报, 54(4): 437 – 442]

Piesik D, Lemńczyk G, Skoczek A, Lamparski R, Bocianowski J, Kotwica K, Delaney KJ, 2011. *Fusarium* infection in maize: volatile induction of infected and neighboring uninfected plants has the potential to attract a pest cereal leaf beetle, *Oulema melanopus*. *Journal of Plant Physiology*, 168(13): 1534 – 1542.

Powell W, Zhang ZL, 1983. The reaction of two cereal aphid parasitoids, *Aphidius uzbeckistanicus* and *A. ervi* to host aphids and their food plants. *Physiological Entomology*, 8(6): 439 – 444.

Soler R, Harvey JA, Kamp AFD, Vet LEM, Van der Putten WH, Van Dam NM, Stuefer JF, Gols R, Hordijk CA, Bezemer TM, 2007. Root herbivores influence the behaviour of an aboveground parasitoid through changes in plant-volatile signals. *Oikos*, 116(3): 367 – 376.

Tai GL, 2004. Effects of *Bacillus thuringiensis* and Transgenic *B. thuringicnsis* Corn on Non-target Pests and *Microplitis mediator* Haliday. PhD Dissertation, China Agricultural University, Beijing. [贠桂玲, 2004. Bt 和转 Bt 基因玉米对非靶标害虫及中红侧沟茧蜂的影响. 北京: 中国农业大学博士学位论文]

Tumlinson JH, Turlings TCJ, Lewis WJ, 1993. Semiochemically mediated foraging behavior in beneficial parasitic insects. *Archives of Insect Biochemistry and Physiology*, 22(3 – 4): 385 – 391.

Turlings TCJ, Bemasconi M, Bertossa R, Bigler F, Caloz G, Silvia D, 1998. The induction of volatile emissions in maize by three herbivore species with different feeding habits: possible consequences for their natural enemies. *Biological Control*, 12(2): 122 – 129.

Wang DA, Sun X, Nan LZ, Li XZ, 1984. Study on a bionomics of *Microplitis* spp., larval parasitic wasp of *Helicoverpa armigera*. *Natural Enemies of Insects*, 6(4): 211 – 218. [王德安, 孙洗, 南留柱, 李小珍, 1984. 棉铃虫低龄幼虫寄生蜂——侧沟茧蜂生物学研究. 昆虫天敌, 6(4): 211 – 218]

Wei JR, Yang ZQ, Du JW, 2007. Semiochemicals used by natural enemies as host seeking signal. *Acta Ecologicca Sinica*, 27(6): 2563 – 2573. [魏建荣, 杨忠岐, 杜家纬, 2007. 天敌昆虫利用信息化学物质寻找寄主或猎物的研究进展. 生态学报, 31(6): 2563 – 2573]

Yao YJ, Xue D, Yang CJ, 2004. Advances on the advances on the relationship between insect behavior and infrochemicals. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 23(4): 478 – 482. [姚英娟, 薛东, 杨长举, 2004. 昆虫行为与信息化合物关系的研究进展. 华中农业大学学报, 23(4): 478 – 482]

Zhang K, Ren LY, Li KM, Wang M, Zhang YJ, Guo YY, 2011. Effect of volatile odors on taxis response of *Microplitis mediator* and its efficiency in field trapping test. *Chinese Journal of Biological Control*, 27(2): 157 – 164. [张康, 任丽燕, 李科明, 王沫, 张永军, 郭予元, 2011. 植物挥发性气味物质对中红侧沟茧蜂的趋向行为影响及田间诱集效果. 中国生物防治学报, 27(2): 157 – 164]

Zhao ZJ, 2011. Optimization Design and Application of Extracting Methods of Maize (*Zea may* L.) Volatile Compounds. MSc Thesis, Henan Agricultural University, Zhengzhou. [赵振杰, 2011. 玉米挥发性物质提取方法优化设计与应用. 郑州: 河南农业大学硕士学位论文]

(责任编辑: 赵利辉)